

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ МОНТАЖЕ И ДЕМОНТАЖЕ СТРУГОВЫХ ЛАВ В УСЛОВИЯХ ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА С ЦЕЛЮ РАЗРАБОТКИ ТИПОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОНТАЖНЫХ И ДЕМОНТАЖНЫХ КАМЕР

*Е.А. Сдвижкова, Д.В. Бабец, Гос. ВУЗ «Национальный горный университет», Украина
А.В. Смирнов, Ю.Я. Чередниченко, ПАО «ДТЭК», Украина*

Сформирована инженерная база для определения основных геомеханических характеристик, необходимых для выбора способа крепления и охраны выработок в условиях присекаемого выработанного пространства. Расчетные формулы получены на основе моделирования геомеханических процессов для широкого спектра горно-геологических и горнотехнических условий современными численными методами.

Актуальность. Основными тенденциями стратегического развития шахт Западного Донбасса, входящими в состав ПАО «ДТЭК ПАВЛОГРАДУГОЛЬ», являются применение высокопроизводительной техники при отработке угольных пластов и концентрация горных работ при одновременном повышении уровня безопасности труда. На структурных подразделениях компании внедряется новое высокопроизводительное оборудования ведущих мировых производителей. В частности отработка пласта С₆ в пределах шахтного поля ШУ «Першотравневе» осуществляется струговой установкой скользящего типа GH800 и механизированным комплексом щитового типа DBT 65/130. Применение новой высокопроизводительной техники, в условиях маломощных пластов шахт Западного Донбасса потребовало внесения новых элементов в технологические схемы отработки угольных пластов и разработки новых технических решений в процессе монтажа-демонтажа оборудования.

Монтаж и демонтаж механизированных комплексов – многооперационный, ответственный и трудоемкий процесс, который выполняется в стесненных условиях подземных выработок, и при этом должен осуществляться в максимально сжатые сроки, поскольку на этапе перемонтажа оборудование исключено из процесса добычи угля, что приводит к недополучению многих миллионов гривен прибыли. К выработкам, где осуществляется монтаж и демонтаж оборудования, предъявляются особые требования как с точки зрения технологичности выполняемых в них операций по размещению и сборке-разборке оборудования, так и с точки зрения устойчивости, поскольку именно эти выработки в наибольшей степени испытывают влияние очистных работ.

В последние годы для осуществления монтажа добычного оборудования в условиях тонких пологих пластов, характерных для Западного Донбасса, повсеместной практикой стало проведение монтажной камеры в два этапа. Проводят оконтуривающую выработку полным сечением, как обычную подготовительную выработку, и затем (либо параллельно) у бока выработки делают присечку пласта, шириной, равной длине секции монтируемой крепи (рис. 1).

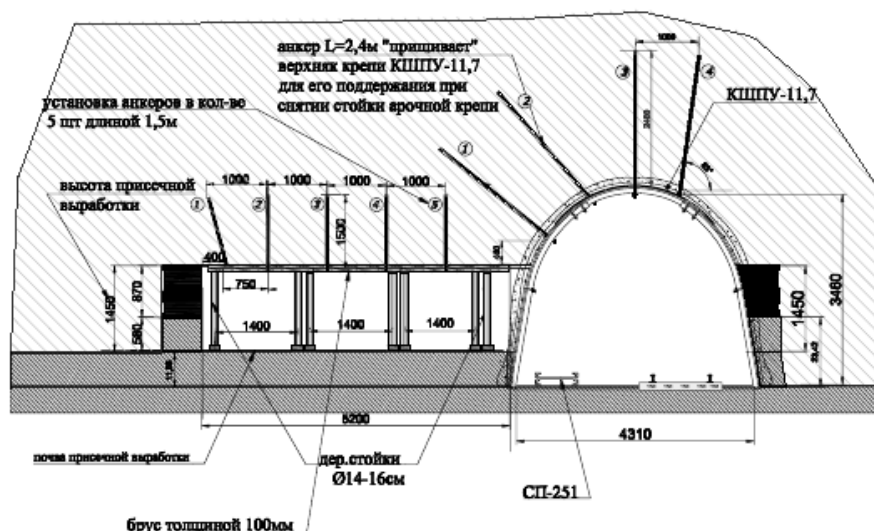


Рис. 1. Монтажная камера с присечной выработкой

Именно такая технология учитывает особенности монтажа секций механизированного комплекса DBT и является приемлемой при подготовке струговой лавы. При отходе секций комплекса от монтажной камеры присечная полость увеличивается вплоть до первичной посадки кровли, создавая тем самым дополнительное давление на крепь монтажной камеры. В существующих нормативных документах не уделено достаточного внимания оценке величины создаваемых при этом нагрузок и обеспечению устойчивости подземного сооружения.

Демонтаж стругового комплекса осуществляется в еще более сложных условиях, поскольку конструктивные особенности конвейера струговой лавы и секций механизированной крепи не позволяют применить традиционную схему с заводкой секций «под брус» в тупике выемочного столба. Наиболее приемлемым решением является предварительное проведение демонтажной камеры достаточного сечения до подхода лавы к месту демонтажа.

Предварительное сооружение демонтажного штрека и демонтаж в нем секций стругового комплекса успешно реализовано для 161-й 163-й струговых лав пласта C_6 гор. 330 м. шахты «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Однако поскольку это первый опыт предварительного проведения демонтажных камер, также отсутствует нормативная база для разработки паспортов крепления с учетом перемещающегося максимума горного давления впереди движущегося забоя лавы, величина которого зависит от взаимного расположения забоя лавы и камеры демонтажа, а также от ряда горно-геологических и горнотехнических факторов.

Комплекс изыскательских работ, выполненный в 2011-2012 годы сотрудниками Государственного ВУЗ «НГУ» и ПАО «ДТЭК», включающий предрасчет проявлений горного давления на основе современных численных методов механики деформируемого тела, визуальные и инструментальные наблюдения, позволил сформировать исходную базу для установления общих закономерностей геомеханических процессов при взаимном влиянии движущегося забоя лавы и камер монтажа-демонтажа оборудования. С использованием разработанных численных алгоритмов оценки напряженно-деформированного состояния массива и методик инструментального обследования полученные закономерности обобщены для всей системы «монтажная камера – лава – демонтажная камера» с учетом всех этапов развития очистных работ и концевых операций.

Установление новых закономерностей развития геомеханических процессов при струговой выемке угля способствовало разработке концепции новых нормативных материалов проектирования (ТМП) камер монтажа-демонтажа очистного оборудования струговых лав в условиях слабометаморфизированных пород Западного Донбасса. Концептуальный подход предполагает конструктивный анализ существующих ТМП, дополнение и расширение действующих нормативных рекомендаций новыми инженерными методиками определения ос-

новых параметров проведения и поддержания выработок, примыкающих к выработанному пространству.

В данной статье в качестве фрагмента подготовки типовых материалов проектирования рассмотрен начальный этап отработки выемочного столба струговой лавой, на котором осуществляется монтаж стругового комплекса и отход лавы от разрезной печи.

Геомеханические процессы в породном массиве при проведении монтажной камеры и разрезной печи. Как указывалось выше, разработанные на сегодняшний день технологические схемы монтажа оборудования не содержат рекомендаций и инструкций по определению характеристик горного давления в окрестности разрезных печей и монтажных камер, их сопряжения, а также сопряжения с выемочными штреками.

В отношении расчета индивидуальной крепи разрезной печи (крепь из деревянных, металлических или гидравлических стоек, которые устанавливаются под шпальный брус) есть только рекомендации нормативного документа [1], согласно которым индивидуальная крепь должна обеспечить отпор не менее 30 т/м^2 . Эти рекомендации не зависят от конкретных горно-геологических условий (глубина разработки, прочность вмещающих пород, мощность пласта или высота разрезной печи).

Для крепи монтажной камеры, вприсечку к которой проводится разрез, образуя тем самым в массиве полость сложного очертания, тем более не разработаны рекомендации, учитывающие взаимное влияние камеры и присечной выработки, увеличение нагрузки при отходе секций механизированной крепи от разрезной печи и увеличении присекаемого пространства.

Сооружение монтажной камеры с точки зрения механики твердого тела представляет собой образование полости в породной слоистой среде, что вызывает соответствующее перераспределение напряжений относительно начального напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива. Последующее формирование присечной выработки т.е. увеличение размеров и формы обнажения, и вызывает дальнейшую переконцентрацию напряжений, т.е. образование зон повышенного (опорного) давления и разгрузки. Соответственно развиваются смещения пород в кровле почве и боках выработок различной интенсивности.

Кроме того, согласно сложившимся представлениям над выработанным пространством вследствие перераспределения напряжений формируется область разрушенных пород (неупругих деформаций), в пределах которой происходит разрыхление пород, потеря связи между слоями пород, заключенных в этой зоне, а также с основной частью массива. Именно с формированием этой зоны связано формирование нагрузки на крепь выработки. Поэтому при проектировании монтажной камеры и разрезной печи основным вопросом является определение зон разрушенных пород, создающих давление, на компенсацию которого должны быть направлены мероприятия по поддержанию данных выработок.

Поскольку монтажная камера вместе с присечной выработкой представляет собой полость сложной формы, образованную в слоистой среде, определение НДС массива в их окрестности области следует осуществлять одним из численных методов механики твердого деформируемого тела, например, хорошо апробированный в задачах геомеханики метод конечных элементов.

Алгоритм метода позволяет моделировать различные стадии развития геомеханических процессов. В данной задаче первоначально моделировалось напряженное состояние нетронутого массива, нагруженного весом вышележащих слоев. Затем в массиве путем изменения граничных условий формировались поэтапно полости различных размеров:

1 стадия – формируется полость, соответствующая монтажной камере арочной формы (рис. 2 а), 2 стадия – дополнительно формируется полость, соответствующая разрезной печи (рис. 2 б); 3 стадия – дополнительно формируется полость размером 5 м, имитирующая выработанное пространство при отходе секций крепи на 5 м от разрезной печи в процессе выемки угля (рис. 2 в).

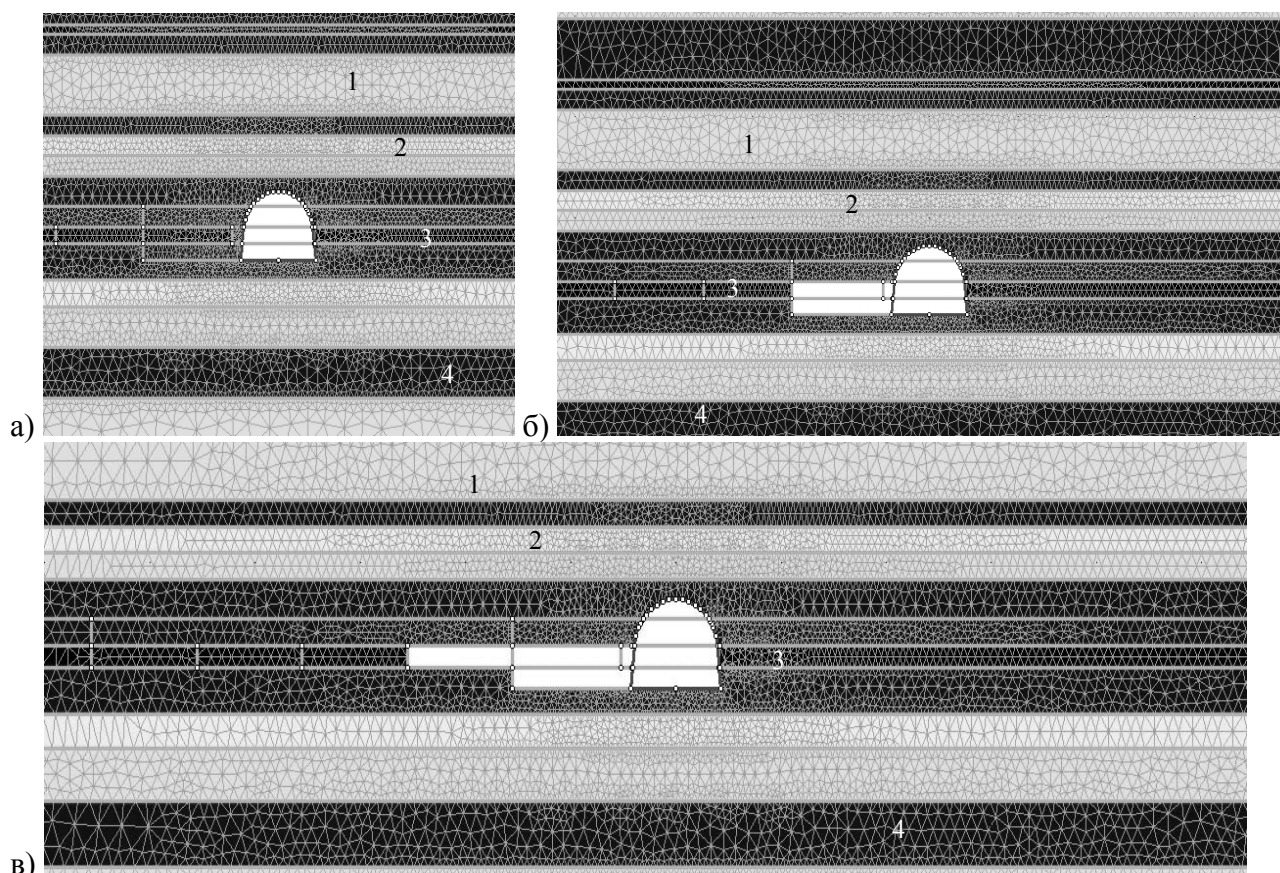


Рис. 2. Расчетные схемы к определению величины нагрузки на крепь монтажной камеры:
1- аргиллит, 2- песчаник, 3 – угольный пласт, 4 – алевролит.
а) - стадия 1, б) - стадия 2, в) - стадия 3.

На каждой стадии определяются все компоненты напряжений, деформаций и перемещений, а также определялась зона разрушенных пород. В качестве условий перехода их в разрушенное состояние использовался хорошо апробированный для слабых трещиноватых пород эмпирический критерий Хоека-Брауна [2], а также аналитический критерий прочности Парчевского-Шашенко, разработанный в НГУ, как альтернативный вариант для подтверждения адекватности применяемых теорий прочности по отношению к слабым породам Западного Донбасса.

Подробно данный алгоритм описан в [3]. Ниже приведены результаты расчетов, выполненные применительно к монтажной камере и разрезной печи 163-й лавы горизонта 470 м шахт «Степная».

Начальное напряженное состояние породного массива, отвечающее глубине разработки 470 м и плотности пород $2,47 \text{ т/м}^3$ составляет 11 МПа.

В соответствии с нормативным документом расчетная глубина должна быть увеличена в 1,5 раз. Тогда к расчету следует принять величину начальных напряжений 18 МПа. Физико-механические свойства вмещающих пород приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики угля и вмещающих пород

| № | Название характеристики | Уголь | Аргиллит | Алевролит | Песчаник |
|---|------------------------------|-------|----------|-----------|----------|
| 1 | Модуль упругости (Юнга), МПа | 11755 | 913 | 1197 | 14856 |
| 2 | Коэффициент Пуассона | 0.26 | 0,3 | 0.3 | 0.3 |
| 3 | Прочность на сжатие, МПа | 20 | 20 | 25 | 55 |

На рис. 3-5 показаны результаты расчетов в виде зон разрушения на различных стадиях формирования выработок при указанных значениях физико-механических свойств. Нагрузки на крепь монтажной камеры и присечной выработки определяются как вес пород в зоне разрушения, то есть:

$$P = \gamma \times S \times k_d \quad (1)$$

где S – площадь зоны разрушения; γ – объемный вес пород; k_d – коэффициент динамичности.

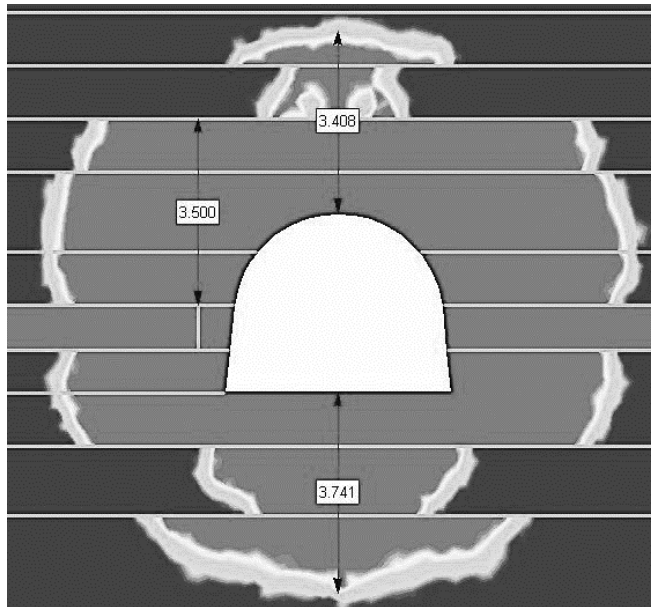


Рис. 3 Зона разрушения при сооружении монтажной камеры (стадия 1)

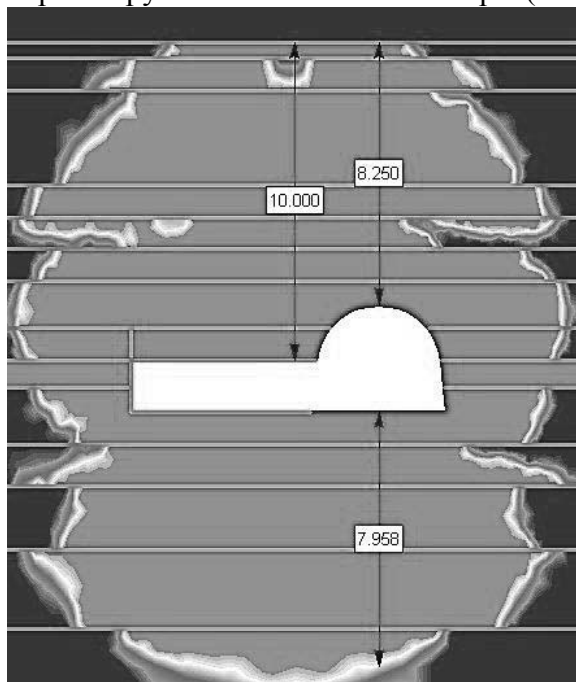


Рис. 4 Зона разрушения при проходке разрезной печи (стадия 2)

Хотя зона разрушения представляет собой область неправильной формы, обусловленной различной прочностью пород, идя в запас прочности будем определять площадь разрушения как площадь прямоугольника с высотой h_p , где h_p – наибольший размер зоны разрушения в направлении, перпендикулярном напластаванию, и основанием, равным ширине выработки b :

$$P = \gamma \times S \times k_d = \gamma \times b \times h_p \times k_d \quad (2)$$

Коэффициент динамичности следует принять равным 1.5, поскольку при определении расчетной глубины заложения выработки уже вводится коэффициент запаса 1.5. Тогда общий коэффициент запаса составит 2.25.

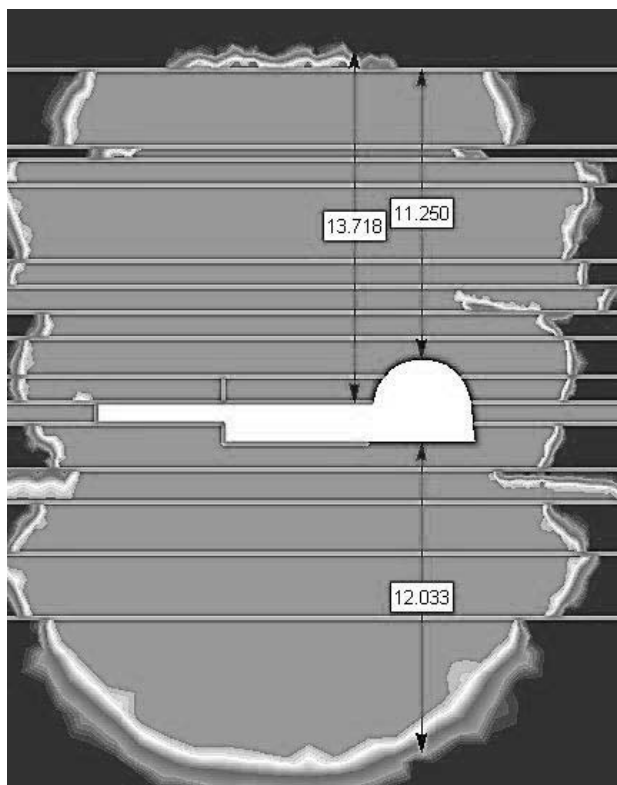


Рис. 5 Зона разрушения при отходе лавы на 5 м (стадия 3)

В соответствии с расчетами нагрузка на крепь монтажной камеры до проходки разрезной печи (стадия 1) составляет 54 т/м. После присечки выработки шириной 5,2 м (стадия 2) нагрузка на крепь собственно камеры составит 131,4 т/м, нагрузка на крепь присечной выработки составит 192,6 т/м. При выезде секций из разрезной печи, то есть при дальнейшем увеличении размеров обнажения (стадия 3), давление пород на крепь присечной выработки увеличится до 263,5 т/м.

Для создания требуемого отпора и удержания пород кровли над монтажной камерой, устанавливается рамно-анкерная крепь, элементами которой являются арочная крепь КШПУ-11,7 с шагом установки 0,5 м и 6 сталеполимерных анкеров длиной 2,4 м между рамами крепи. Несущая способность $R_{кр}$ одной арки крепи КШПУ-11,7 – с замковыми соединениями ЗПКм (по данным стендовых испытаний в ДонУГИ ООО "Геомеханика" и "Донбасскрепь") составляет 421 кН (42,1 т) на 1 арку. Таким образом, арочной крепью обеспечивается отпор 842 кН/м (84,2 т/м). Количество анкеров и силовые параметры выбираются в соответствии с [4].

Для создания достаточного отпора в присечной выработке выполняется расчет несущей способности индивидуальной крепи:

Согласно [5, стр. 109] рабочее сопротивление деревянной стойки длиной 1,25-1,5 м и диаметром 0,14 м составляет 30 т. (300 кН). Для удержания пород в зоне разрушения при образовании присечной выработки, то есть для создания отпора 192 т/м (2 стадия) необходимо количество стоек на 1 метр выработки:

$$n = 192/30 = 6,5 \text{ шт.} \quad (3)$$

При выезде секций из разрезной печи, то есть при дальнейшем увеличении размеров обнажения, давление пород на крепь присечной выработки увеличится до **263 т/м**. Тогда необходимое количество стоек индивидуальной крепи составит:

$$n = 263/30 = 8,7 \text{ шт.} \quad (4)$$

Для равномерного отпора под деревянную рамку следует установить 10 стоек, и одну дополнительную стойку установить в месте нахлеста деревянных досок. Суммарный отпор стоек составит:

$$P = 30 \times 11 = 330 \text{ т/м} \quad (5)$$

Данный расчет, выполненный для конкретных условий горизонта 470 м шахты «Степная», показывает, что основной геомеханической характеристикой, определяющей паспорт крепи является нагрузка на крепь, полученная как вес пород в зоне неупругих деформаций. При этом для инженерного расчета в качестве основной расчетной величины принимается наибольший размер зоны разрушения в направлении, перпендикулярном напластаванию (h_p).

Расчеты давления на крепь по изложенному выше алгоритму выполнены для различных значений глубины залегания и мощности угольного пласта, прочности вмещающих пород, формы поперечного сечения монтажной камеры. Результаты многовариантного моделирования использованы для получения простых инженерных формул, позволяющих определить величину h_p для различного сочетания параметров. Использовался метод нелинейного оценивания, который обобщает в себе два метода: множественную регрессию и дисперсионный анализ.

Для монтажной камеры **арочной** формы, вприсечку к которой проведена разрезная печь (присечная выработка), высота зоны разрушения над **монтажной камерой** определяется формулой:

$$h_p = \exp\left(0,64 + 0,4 \frac{b}{h} + 0,92 \frac{\gamma H}{R_c} + 0,005 \cdot m\right) + 1,52. \quad (6)$$

Для высоты зоны разрушения над **присечной выработкой** получена зависимость:

$$h_p = \exp\left(0,47 + 0,78 \frac{b}{h} + 0,67 \frac{\gamma H}{R_c} + 0,006 \cdot m\right) + 3,75. \quad (7)$$

Здесь:

- b – ширина выработки в проходке,
- h – высота выработки,
- γH – вертикальная составляющая начального поля напряжений,
- R_c – средняя прочность вмещающего массива,
- m – мощность угольного пласта

Полученные формулы могут быть включены в нормативный документ для определения нагрузки на крепь монтажной камеры и присечной выработки и составления соответствующего паспорта крепи.

Выводы:

1. С привлечением апробированных численных методов механики горных пород, а также современных теорий прочности, прослежен процесс формирования зон разрушения над монтажной камерой и прирост нагрузки на крепь вследствие увеличения обнажения при присекании угольного пласта и отхода лавы от разрезной печи.

2. На основе многовариантного моделирования и применения метода регрессионного анализа получены обобщающие зависимости величины зоны разрушения от основных влияющих факторов, что является основой инженерного расчета и составления паспорта крепи.

Список литературы

1. СОУ 10.1-00185790-002-2005. Правила технічної експлуатації вугільних шахт.
2. Hoek E. (2002). Practical Rock Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy. pp. 325.
3. Разработка типовых материалов для проектирования монтажных и демонтажных камер струговых лав и монтажа-демонтажа оборудования в них. Отчет по НИР. – Днепропетровск, изд. НГУ. – 2012 г. – 177с.
4. СОУ 10.1.05411357.010:2008 Системы обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерной крепью.
5. Руководство по безопасному производству монтажно-демонтажных работ механизированных комплексов// Углемеханизация. – Луганск, 2001.